第 39 卷 第 5 期
2022 年 10 月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 39 No. 5
Oct. 2022

文章编号:1000-4939(2022)05-0908-07

逆流条件下仿生鱼自主游动行为研究

周建军,袁显宝,毛璋亮,肖仁政

(三峡大学机械与动力学院,443000 宜昌)

摘 要:深入开展鱼类自主游动机理研究,对鱼类运动行为以及仿生技术研究都具有重要的意义。以某型仿生鱼为研究对象建立了鱼体的简化模型和鱼体摆动的计算模型,采用动网格技术开发了控制鱼体摆动的 UDF 程序,利用 Fluent 软件对仿生鱼的自主游动行为进行了仿真模拟,研究了鱼类自主游动的机理以及在逆流情况下不同来流方向时的受力情况。通过计算发现,逆流时水流方向对仿生鱼的自主游动有很大的影响,当水流方向和鱼游动方向成 180°,鱼向前游动的阻力最小,侧向分量的存在会减小鱼向前运动的驱动力。

关键词:自主游动;运动仿生;动网格;CFD 模拟

中图分类号:O35;TP24 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.012

Numerical analysis about hydrodynamics characteristics for autonomous swimming of bionic fish in counter flow

ZHOU Jianjun, YUAN Xianbao, MAO Zhangliang, XIAO Renzheng

(College of Mechanical & Power Engineering of China Three Gorges University, 443000 Yichang, China)

Abstract: It is very important to study the swimming rules of fish for biomimetic robotic and fish behavior research. This article established the simplified model and calculation model about fish oscillation based on a kind of bionic fish and self-propelled swimming. The calculation used dynamic grid technique and developed UDF program for fish oscillating control, analyzed the self-propelled swimming mechanism of fish with software Fluent, and also analyzed the influence of inflow angle of fluid on fish swimming behavior in counter flow. It can be found that inflow angle has a larger effect on fish swimming in counter flow, the resistance of fish swimming is smallest when the angle between inflow and fish swimming direction is 180. Lateral component of inflow can decrease the driving force of autonomous swimming.

Key words: self-propelled swimming; bionic movement; dynamic mesh; CFD simulation

在过去几十年中,人们在研究自然界动物的推进机制方面做了大量的工作,这对于解决空气动力学中的一些问题以及在仿生机器设计方面都具有重要的意义[1-3]。其中鱼类由于在水中具有非凡的机动性,且运动效率高、隐蔽性好等优点,吸引了大量的研究者对其运动机理进行研究。

郝栋伟等[4]基于浸入边界法的流固耦合建模思想,以鱼体肌肉提供的主动力为原动,建立了鱼体内

收稿日期:2021-03-23 **修回日期**:2022-07-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11605103)
通信作者:周建军。E-mail: zjj6958@sina.com
引用格式:周建军,袁显宝,毛璋亮,等. 逆流条件下仿生鱼自主游动行为研究[J]. 应用力学学报,2022,39(5):908-914.
ZHOU Jianjun, YUAN Xianbao, MAO Zhangliang, et al. Numerical analysis about hydrodynamics characteristics for autonomous swimming of bionic fish in counter flow[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(5): 908-914.

力、鱼体运动和外界流体耦合作用的自主游动柔性鱼模型,对不同长度尾鳍,不同弹性模量鱼体的自主直线巡游进行了模拟。严慧云等[5]利用 Fluent 软件,采用动网格技术对仿生鱼的自主游动进行了模拟分析,结果表明在自主巡游阶段,仿生鱼通过摆动鱼体,在鱼体两侧流场产生高压和低压区,依靠流体的正压梯度获得前进的推动力,在 C 形快速起动阶段,仿生鱼通过快速大幅度的回摆获得加速度,从而实现快速起动。Deng 等[6]利用浸入边界法,研究了单体鱼和多体鱼的自主游动行为。王亮等[7-8]采用自适应浸没边界方法,数值模拟了仿生鱼在不同自由度个数情况下的游动,对比分析了自由度个数对仿生鱼受力、能耗、推进效率以及尾涡结构的影响。研究结果表明,推进效率随着自由度个数的增加而略有降低。Cui 等[9-10]采用游动指数对 BCF 鱼的游动行为进行研究,分析了摆动频率、波形等参数对游动的影响。夏全新等[11]采用有限体积法,并利用动网格技术对鱼类波状摆动推进进行了数值模拟,研究了零厚度波纹板的摆动推进以及用 NACA 标准翼型模拟有厚度鱼体的波状摆动。徐晓峰[12]通过运用人工伪压缩方法求解三维不可压缩非定常 N-S 方程,对金枪鱼和鲤鱼的自主游动以及鲤鱼游动轨迹的控制问题进行研究,分析了影响鱼类游动的因素,并对鱼的游动控制提出了一些方法。陈宏等[13]基于 C 形转向的仿生学研究和简化物理模型,建立了鱼形机器人快速转向的运动学方程,分析体干中线运动步态和鱼体质心的运动规律,提出了有效提高鱼形机器人快速转向性能的方法。

虽然针对鱼类运动人们开展了大量的研究也取得了一定的研究成果,但是鱼游动的内在机理是非常复杂的,不仅要考虑鱼的主动控制、与流体相互耦合作用等问题,还要考虑到不同鱼类的不同鱼体外形及游动特点。目前针对鱼类运动行为的研究,大部分都集中在鱼体游动行为的机理以及本体运动参数的影响[14-18],对于游动过程中外部环境的影响研究的较少。而鱼类在实际的游动过程中外部的流体并不会处于理想状态,流体参数都是随时发生变化的,在这种情况下研究鱼体的受力和运动情况,对于分析流体对鱼类运动的作用机理和研究仿生鱼的运动控制都有重要的意义。由于鱼在水中的游动可以近似看作是在平面上的二维运动,而鱼游动过程中的流场分布却是三维的。因此,本研究以尾鳍游动的鱼为研究对象建立了仿生鱼的三维分析模型,研究了在二维运动规律下仿生鱼的自主游动以及来流方向对仿生鱼自主游动行为的影响。

1　物理模型

参考常见尾鳍推进模式鱼的实体模型,忽略胸鳍、腹鳍、背鳍等结构,建立仿生鱼的三维分析模型,见图 1。鱼体外形为半椭圆 + 抛物线形流线,鱼体三维尺寸为:$x \times y \times z = 0.25\ \mathrm{m} \times 0.07\ \mathrm{m} \times 0.03\ \mathrm{m}$,图中:$v$ 为仿生鱼自主游动速度;u 为流体流动速度;θ 为仿生鱼游动方向和来流方向的夹角。

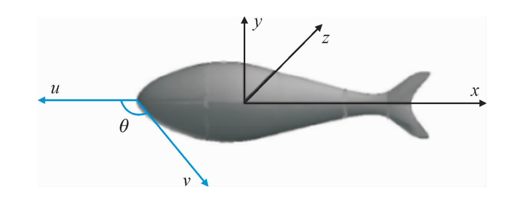


图 1　鱼体模型

Fig. 1　Model of fish

在本研究的模拟过程中只考虑仿生鱼在二维运动规律下的自主游动,这种运动规律能够反映鱼体在正常游动情况下的运动行为,仿生鱼体绕流的控制方程[5]为

$$\begin{cases} \nabla \cdot u = 0 \\ \dfrac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = -\dfrac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \end{cases} \quad (1)$$

其中:u 为流体速度;p 为流体压力;ρ 为流体密度;ν 为流体的动力学黏性系数。依据仿生鱼自主游动状态,可以得出其受力控制方程为

$$m \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = F \quad \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} = M \quad (2)$$

其中:m 为鱼体质量;U 为鱼体游动速度;F 为鱼体在速度方向上受到的合力;M 为力矩;L 为动量矩。

$$L = \sum_i m_i r_i \times \nu_i \quad (3)$$

其中:m_i 是第 i 个单元的质量;r_i 是单元 i 的中心;ν_i 是鱼体坐标中的位置变化速率,ν_i 由两部分组成,即

$$\nu_i = \nu_{fi} + \omega_i \times r_i \quad (4)$$

其中:ν_{fi} 由摆动规律决定;ω_i 是单元 i 的角速度。因此

$$L = \sum_i m_i r_i \times \nu_{fi} + \sum_i m_i r_i^2 \times \omega_i \quad (5)$$

为了使式(2)有唯一解,必然有

$$\omega_1 = \omega_2 = \cdots = \omega \quad (6)$$

因此

$$m\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=F,$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\sum_i m_i r_i\times v_{fi}\right)+\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\omega\sum_i m_i r_i^2\right)=M \quad (7)$$

当 u 和 ω 确定后,鱼体新的位置和新的迎角就可以确定。

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=u,\quad \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega \quad (8)$$

其中:$\theta=\theta_x i+\theta_y j+\theta_z k$,$\theta_x$、$\theta_y$ 和 θ_z 分别表示在 y-z、x-z、x-y 平面鱼体中线和坐标轴 y、z、x 正方向的夹角。

为了减小计算边界对仿生鱼自主游动行为的影响,本研究取鱼体长度为 l,计算区域设置为 $7l\times3l$。鱼体在高度上处于计算区域的中间位置,在长度方向上鱼头顶点位置距离计算区域入口边界 $4l$,鱼尾距离计算区域出口边界 $2l$。计算区域设置如图 2 所示。

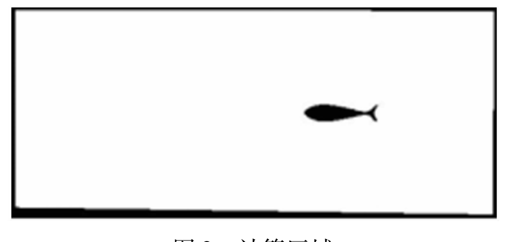


图 2 计算区域

Fig. 2 Computed region

由于鱼体模型结构的不规则,在划分网格时为了保证网格质量,采用四面体网格对计算域进行网格划分,同时对仿生鱼表面进行了局部网格加密,计算域网格划分由 Gambit 软件完成。利用 Fluent 软件的动网格功能来模拟鱼体的运动,仿生鱼运动规律的控制通过编写相应的 UDF 程序实现,参考相关文献取仿生鱼轴线运动规律[19]为

$$h(x,t)=a(x)\sin(kx-\omega t) \quad (9)$$

$$a(x)=c_1x_l+c_2x_l^2,\ -0.194<x_l<0.056 \quad (10)$$

其中:$h(x,t)$ 为仿生鱼中心线的侧向位移;x 为仿生鱼中心线在体长方向上的位置坐标;$a(x)$ 为波幅包络线函数;$k=2\pi/\lambda$ 为鱼体波的数量,文中取 $\lambda=1.4$;ω 为仿生鱼摆动的角频率,$\omega=2\pi f$,f 为仿生鱼摆动的频率,本研究取 1。

入口边界条件设置为速度入口, 速度大小为来流速度, 出口边界设置为自由出流。在分析仿生鱼自主游动时, 不考虑来流影响, 进出口均设置为壁面边界条件; 时间步长设置为 0.01 s, 计算时间为 6 s。

2 结果与讨论

2.1 自主游动行为分析

仿生鱼在运动过程中,周围流场分布会对仿生鱼的运动产生一定的影响,流场分布对仿生鱼运动的影响不能忽略,只有分析仿生鱼在静止流场中的运动才能单纯地研究仿生鱼在游动过程中鱼体和流体之间的作用过程。为了更直观地了解仿生鱼在流场中的自主游动行为,同时也为了验证计算结果的合理性,假定鱼体处于一静止水中,由静止开始按照式(9)所给规律在水中运动,可得到仿生鱼自主游动过程中的受力以及运动情况,压力场分布、涡量分布以及等值面图如图 3 ~ 图 5 所示。

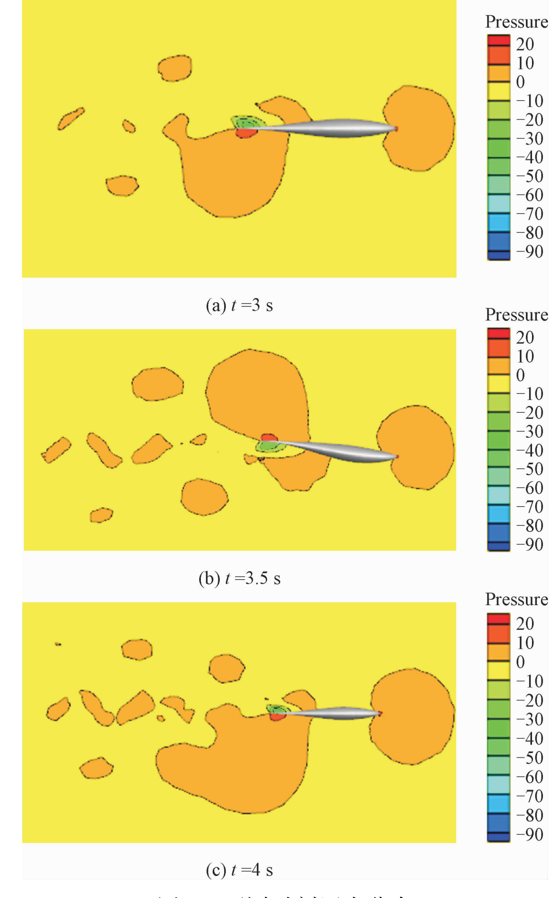


图 3 不同时刻压力分布

Fig. 3 Pressure distribution at different moments

从图 3 可以看出,仿生鱼在自主游动过程中,头部位置受到的阻力较大,在所有时刻都处于高压状态,鱼体两侧在不同时刻会依据鱼体摆动状态交替出现高低压区域。仿生鱼游动过程中靠近尾部位置在摆动方向会出现压力较高的区域,而在相反方向

则为低压区域，这些压力差的存在为仿生鱼的游动提供了动力。同时在尾流区域会出现比较明显的压力扰动区域和漩涡脱离现象，这些现象与相关文献[5]中描述鱼的运动规律比较吻合，验证了本研究所开发程序的正确性。此外，通过仿生鱼自主游动时的等值面分布图可以看出，仿生鱼在自主游动时其压力和涡量分布是三维的，压力和涡的分布在尾部两侧比较明显，而在仿生鱼中心线附近的分布并不明显。因此，采用三维模拟可以对仿生鱼在自主游动过程中的受力以及周围流场的变化进行较为准确的描述。

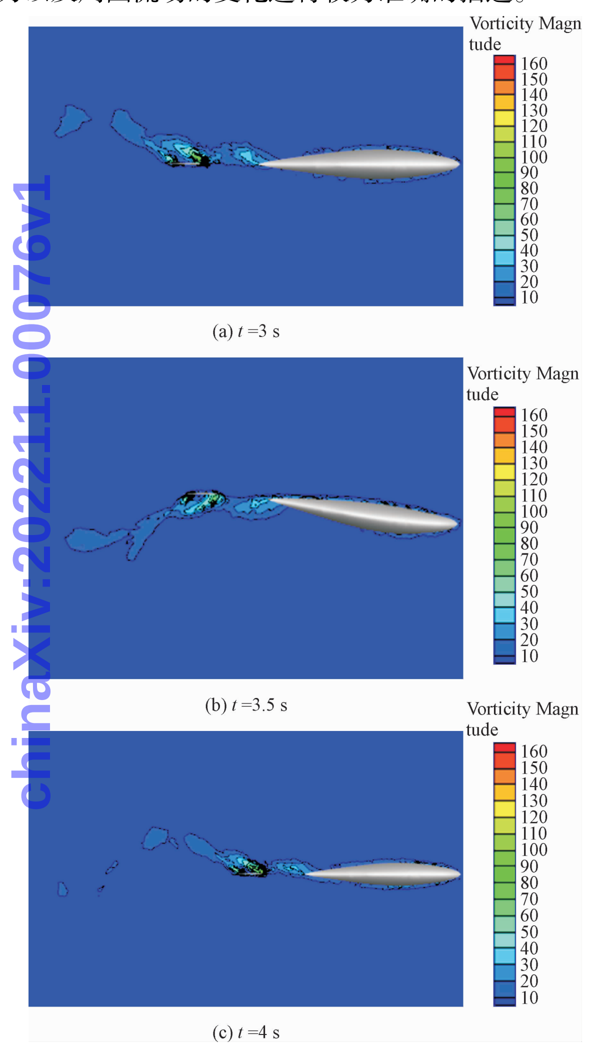


图 4　不同时刻涡量分布

Fig. 4　Vorticity distribution at different moments

2.2　来流方向的影响

仿生鱼在水中游动，水流的速度和方向并不是保持不变的，而这种流场的变化必然会对仿生鱼的运动产生一定的影响。因此，为了分析来流参数对仿生鱼自主游动行为的影响，研究了在来流速度为 0.1 m/s，θ 分别为 90°、165°和 180°时仿生鱼的自主游动和受力情况。在 4 s 时各 θ 角下的压力场和涡场分布如图 6 ~ 图 7 所示。

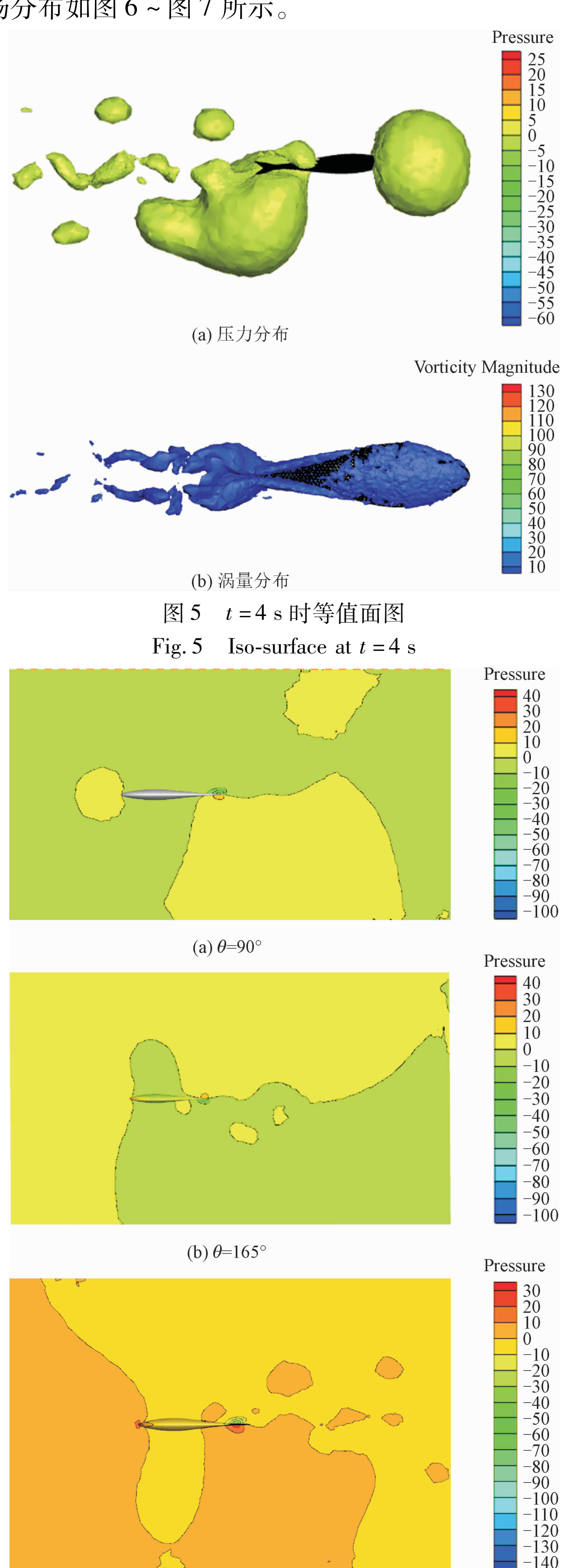


图 5　t = 4 s 时等值面图

Fig. 5　Iso-surface at t = 4 s

图 6　流速 u = 0.1 m/s 不同 θ 角 4 s 时压力场

Fig. 6　Pressure distribution at 4 s with different θ when u = 0.1 m/s

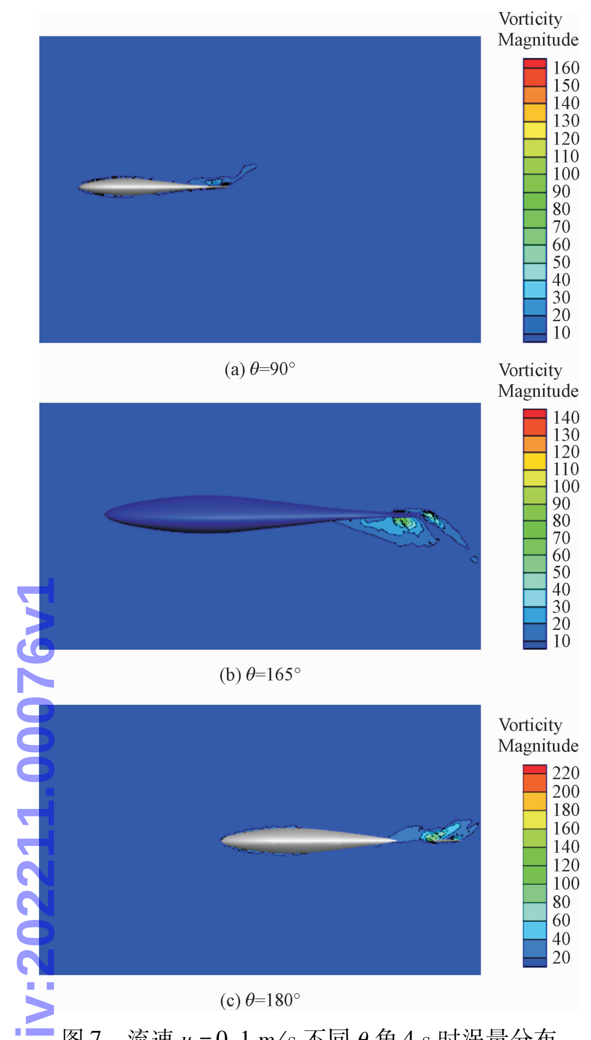


图 7 流速 $u=0.1$ m/s 不同 θ 角 4 s 时涡量分布

Fig. 7 Vorticity distribution at 4 s with different θ angels when $u=0.1$ m/s

从图 6 和图 7 可以看出，在流体速度为 0.1 m/s，来流方向垂直于鱼自主游动方向时，在仿生鱼的周围有比较明显的压力变化区域，负压值也较大。当来流方向和仿生鱼自主游动方向夹角变为 165°时，鱼体周围出现正负压力区域，并存在一定的压力梯度。当来流方向和鱼体自主游动方向相反时，在仿生鱼的后部和周围可以出现比较明显的压力变化区域，而且压力梯度变化范围也是最大的。另外，通过计算发现：当 $\theta=90°$时在 4 s 时刻仿生鱼的游动速度为 −0.174 m/s；当 $\theta=165°$时在 4 s 时刻仿生鱼游动速度为 −0.153 3 m/s；$\theta=180°$时在 4 s 时刻仿生鱼自主游动速度大小为 −0.187 m/s。虽然 $\theta=180°$时流体速度分量全部作用在鱼体运动方向上，但是仿生鱼的游动速度却是最大的。$\theta=90°$时，鱼体只受到垂直方向的流体分量的影响，自主游动方向的作用为 0，但是自主游动的速度却小于 $\theta=180°$时的速度。而当 $\theta=165°$时，仿生鱼在游动方向和垂直方向都会受到流体流动分量的作用，此时自主游动速度反而要比 $\theta=90°$时的还要小。可见，当流动方向和鱼体运动方向平行时，可以获得较大的自主游动速度，运动阻力最小，当来流方向与鱼体游动方程垂直（$\theta=90°$）时，自主游动速度相对 $\theta=180°$时要小，而游动方向与来流方向存在一定夹角（$90°<\theta<180°$）时，自主游动的速度最小，阻力最大。

在同一时刻不同 θ 角时，鱼体不同方向受力情况如图 8 ~ 图 9 所示。

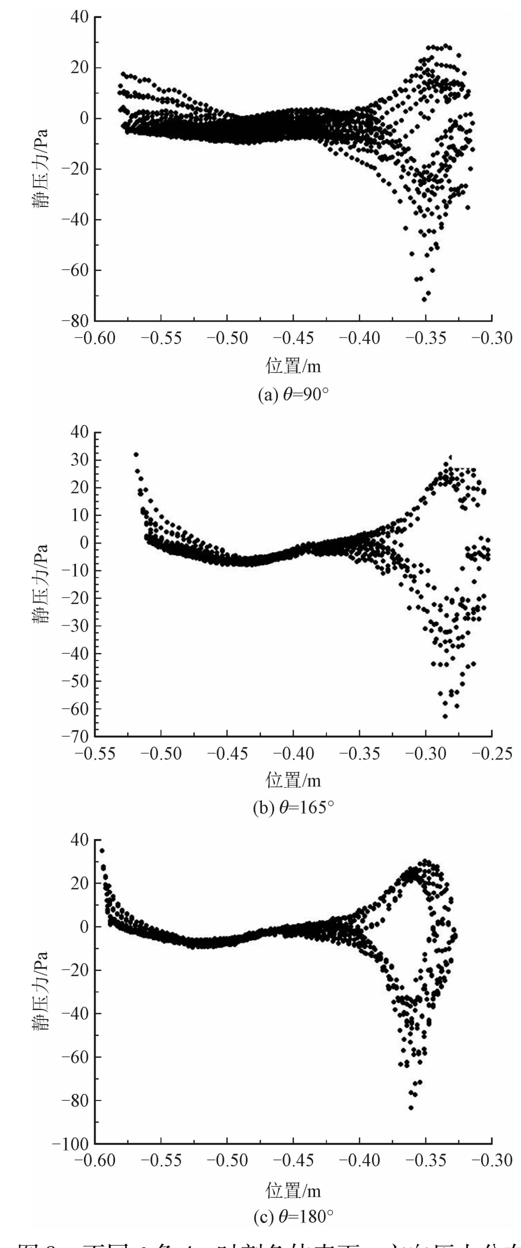


图 8 不同 θ 角 4 s 时刻鱼体表面 x 方向压力分布

Fig. 8 Pressure distribution in x direction at 4 s with different θ angels

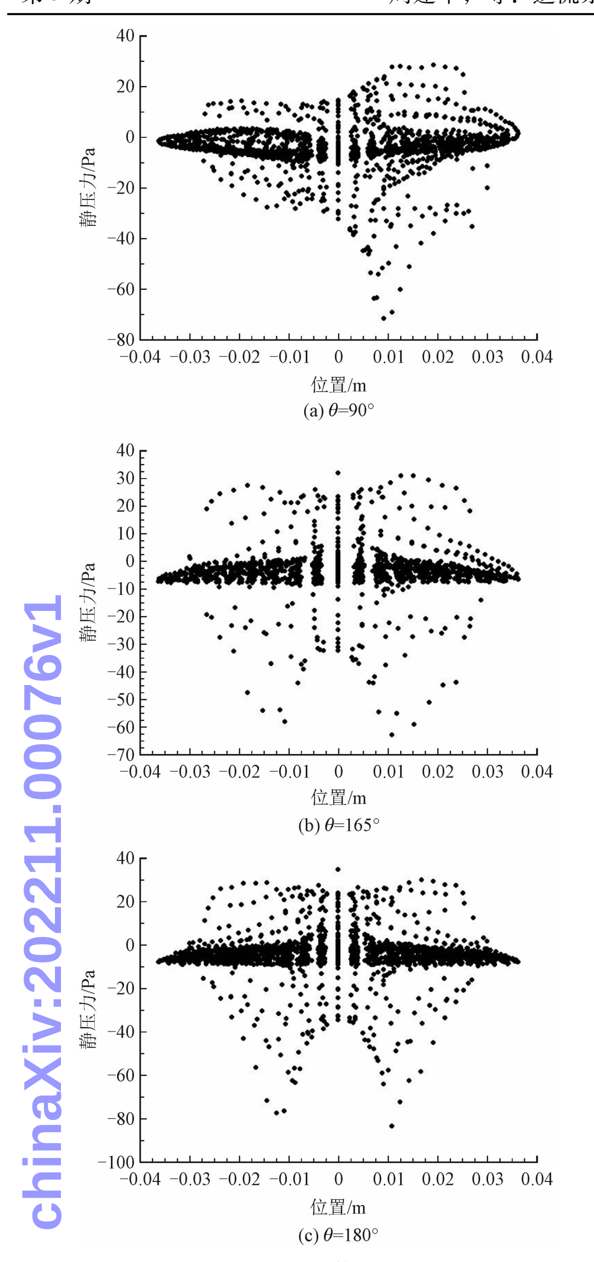


图 9　不同 θ 角 4 s 时刻鱼体表面 y 方向压力分布

Fig. 9　Pressure distribution in y direction at 4 s with different θ angels

从图 9 可以看出，当 $\theta = 90°$ 时仿生鱼沿长度方向均出现正负压力区域，且正负压差较大，分布存在一定的不对称性，这种正负压力区域的产生正是由于涡的脱离产生的，也是鱼向前运动的动力。此外，在 y 方向鱼体两侧压力也存在明显的不平衡，两侧正负压差较大，迎着来流方向的那一边正负压力都大于背流区域。当 $\theta = 165°$ 和 $\theta = 180°$ 时鱼头部位有明显的高压区域，尾部均存在正负压力区域且不对称，鱼体在长度方向上交替出现正负压力区域，说明仿生鱼在游动方向受到比较大的驱动力，两种角度下鱼体表面的压力分布基本相同，但是在 $\theta = 180°$ 时仿生鱼尾部的正负压力差较大，从 y 方向鱼体表面压力分布图可以看出，鱼体上下表面的压力分布对称，有较大正负压差存在，$\theta = 180°$ 时压力差更大一些。因此，通过鱼体表面受力情况可以看出，鱼尾部的正负压力的不平衡是引起鱼运动的主要原因，而且这种压差越大，仿生鱼所受到的驱动力也会越大。

3　结　论

本研究针对仿生鱼在逆流条件下的自主游动行为进行仿真模拟，研究来流角度对仿生鱼游动行为的影响。与以往针对仿生鱼游动机理和分析方法的研究相比，更注重考虑外界流体环境对仿生鱼游动行为的影响，对仿生鱼游动控制策略的制定具有一定的参考价值。通过计算可以看出，仿生鱼在水中自主游动的过程中，鱼体表面会交替出现正负压力区域，其尾流区域会出现比较明显的涡脱离现象，这种涡的脱离会给鱼提供前进的动力。从不同来流方向时的仿生鱼的运动可以看出，当仿生鱼游动方向与来流方向平行时可以获得比较大的自主游动速度，当来流方向和仿生鱼游动方向有一定角度时，虽然在游动方向上流动分量较小但是鱼体自主游动的速度反而要小。另外，从仿生鱼体表面压力分布图可以看出，仿生鱼尾部明显正负压力不平衡的存在是产生驱动力的原因，在仿生鱼运动存在逆向流体分量时，仿生鱼的运动控制可以考虑迎着水流运动或者沿垂直于水流方向运动，这样可以提高运动效率。

参考文献：

[1]　王冉冉. 仿鱼机器人稳态游动的水动力性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.

[2]　童秉纲，孙茂，尹协振. 飞行和游动生物流体力学的国内研究进展概述[J]. 自然杂志，2005，27(4)：191-198.
TONG Binggang，SUN Mao，YIN Xiezhen. A brief review on domestic research developments in biofluiddynamics of animal flying and swimming[J]. Chinese journal of nature，2005，27(4)：191-198(in Chinese).

[3]　WU Chuijie，WANG Liang. Where is the rudder of a fish? The mechanism of swimming and control of self-propelled fish school[J]. Acta mechanica Sinica，2010，26：45-65.

[4]　郝栋伟，王文全. 某型仿生鱼自主直线巡游速度的影响因素研究[J]. 应用数学和力学，2014，35(6)：674-682.
HAO Dongwei，WANG Wenquan. Parametric study on the straight-

line cruising velocity of an auto-swimming robotic fish[J]. Applied mathematics and mechanics,2014,35(6):674-682(in Chinese).

[5] 严惠云,张浩磊,刘小民. 一种仿生鱼体自主游动的水动力特性分析[J]. 西安交通大学学报,2016,50(2):138-143.
YAN Huiyun,ZHANG Haolei,LIU Xiaomin. Numerical analysis of hydrodynamics characteristics for autonomous swimming of bionic tunas[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2016,50(2):138-143(in Chinese).

[6] DENG Jian,SHAO Xueming,REN Anlu. Numerical study on propulsive performance of fish-like swimming foils[J]. Journal of hydrodynamics,2006,18(6):681-687.

[7] 王亮,王明,付强,等. 自由度对鱼类自主游动数值模拟结果的影响[J]. 计算力学学报,2014,31(2):259-264.
WANG Liang,WANG Ming,FU Qiang,et al. Effects of degree of freedom on numerical results of self-propelled fish swimming[J]. Chinese journal of computational mechanics,2014,31(2):259-264(in Chinese).

[8] 王亮,陈宗芳,付强,等. 鱼类自主游动水动力学特性的数值模拟[J]. 力学学报,2012,44(1):179-183.
WANG Liang,CHEN Zongfang,FU Qiang,et al. Numerical simulation of the hydrodynamics of self-propelled fish swimming[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics,2012,44(1):179-183(in Chinese).

[9] CUI Z,YANG Z,SHEN L,et al. Complex modal analysis of the movements of swimming fish propelled by body and/or caudal fin[J]. Wave motion,2018,78:83-97.

[10] BERENSHTEIN I,PARIS C B,GILDOR H,et al. Auto-correlated directional swimming can enhance settlement success and connectivity in fish larvae[J]. Journal of theoretical biology,2018,439:76-85.

[11] 夏全新,鲁传敬,吴磊. 鱼类波状摆动推进的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展,2005,20:921-928.
XIA Quanxin,LU Chuanjing,WU Lei. Numerical simulation about fish undulating advancing[J]. Journal of hydrodynamics,2005,20:921-928(in Chinese).

[12] 徐晓峰. 仿生鱼游动与运动控制的数值分析技术[D]. 上海:上海交通大学,2011.

[13] 陈宏,竺长安,尹协振,等. 鱼形机器人快速转向的运动特性研究[J]. 应用力学学报,2008,25(2):229-234.
CHEN Hong,ZHU Chang'an,YIN Xiezhen,et al. Kinematic characters on c-turn swimming of fish-like robot[J]. Chinese journal of applied mechanics,2008,25(2):229-234(in Chinese).

[14] GHARALI K,JOHNSON D A. Dynamic stall simulation of a pitching airfoil under unsteady free stream velocity[J]. Journal of fluids and structure,2013,42:228-244.

[15] LIU H,WASSERSUG R J,KAWACHI K. A computational fluid dynamics study of tadpole swimming[J]. Journal of hydrodynamics:series B,2006,18(6):681-687.

[16] 夏丹,陈维山,刘军考,等. 仿生机器鱼自主游动中的流体结构耦合新方法[J]. 机械工程学报,2014,50(7):15-21.
XIA Dan,CHEN Weishan,LIU Junkao,et al. New method of fluid-structure coupling in self-propelled swimming for biomimetic robotic fish[J]. Journal of mechanical engineering,2014,50(7):15-21(in Chinese).

[17] BERGMANN M,IOLLO A. Modeling and simulation of fish-like swimming[J]. Journal of computational physics,2011,230:329-348.

[18] 冯亿坤,苏玉民,宿原原,等. 仿生机器鱼自主游动的数值计算方法与机理[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(12):18-24.
FENG Yikun,SU Yumin,SU Yuanyuan,et al. Study on numerical simulation method and mechanism of bionic robot fish's self-propelled swimming[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (nature science edition),2019,47(12):18-24(in Chinese).

[19] IMAN B,FOTIS S. Numerical investigation of the hydrodynamics of carangiform swimming in the transitional and inertial flow regimes[J]. Journal of experimental biology,2008,211(10):1541-1558.

(编辑 李坤璐)